

Research on the Cooperative Control Technology of PLC and Industrial Robots in Electrical Automation Control Systems

Hai Chen

Bingtuan Xingxin Vocational and Technical College, Tiemenguan, Xinjiang, 841007, China

Abstract

Under the rapid impetus of the waves of intelligent manufacturing and Industry 4.0, the intelligence level of electrical automation control systems has been continuously rising. The collaborative control technology of industrial robots and programmable logic controllers (PLCs) has become a core element for modern manufacturing production lines to enhance efficiency and achieve flexible production. This article conducts a comprehensive and systematic study on the collaborative control of PLC and industrial robots. First, a thorough review was conducted on its theoretical basis and current development status, laying a solid foundation for subsequent research. Then, the integration methods and communication mechanisms of the two in the electrical automation system were elaborated in detail, revealing how they achieve effective connection and information exchange. Finally, the key technologies of cooperative control were analyzed in detail, and typical application cases were listed to demonstrate the powerful efficiency and huge potential of this technology in actual production, providing a strong reference for the development of related fields.

Keywords

Electrical Automation; PLC; Industrial robot; Cooperative control; Intelligent manufacturing; Communication protocol

电气自动化控制系统中 PLC 与工业机器人的协同控制技术探究

陈海

新疆生产建设兵团兴新职业技术学院, 中国·新疆 铁门关 841007

摘要

在智能制造与工业4.0浪潮的迅猛推动下, 电气自动化控制系统的智能化程度持续攀升。工业机器人与可编程逻辑控制器(PLC)的协同控制技术, 已然成为现代制造业生产线提升效率、达成柔性生产的核心要素。本文对PLC与工业机器人协同控制展开了全面且系统的研究。先是深入梳理了其理论基础与发展现状, 为后续研究筑牢根基。接着详细阐述了二者在电气自动化系统里的集成方式以及通讯机制, 揭示了它们如何实现有效连接与信息交互。最后, 重点剖析了协同控制的关键技术, 并列典型应用案例, 展现该技术在实际生产中的强大效能与巨大潜力, 为相关领域的发展提供有力参考。

关键词

电气自动化; PLC; 工业机器人; 协同控制; 智能制造; 通讯协议

1 引言

新一轮科技革命与产业变革推动制造业向智能化、自动化、柔性化方向加速演进, 电气自动化控制系统作为智能制造的重要基础平台, 其核心功能和技术模式正发生深刻变革。本文以电气自动化控制系统为切入点, 探讨 PLC 与工业机器人协同控制的技术体系、关键难点及发展趋势, 旨在为智能制造系统的设计、集成与优化提供理论借鉴与工程实践参考。

2 PLC 与工业机器人协同控制的理论基础与发展演变

2.1 PLC 与工业机器人的功能定位与优势互补

可编程逻辑控制器(PLC)作为现代工业自动化领域的核心控制单元, 广泛应用于各种生产线和自动化装备之中。PLC 拥有强大的逻辑运算、时序控制、信号采集和基础运动控制能力, 能够对生产流程中的多环节进行高效的实时协调和调度管理。其硬件结构高度可靠, 具备抗干扰能力强、运行稳定、故障率低等优点, 同时还拥有丰富的输入输出接口和模块化扩展能力, 能够灵活适应多变的工业现场需求。PLC 的编程方式简明易用, 支持多种编程语言和国际标准, 使得现场工程师能够快速开发、维护和升级自动化控制系统, 提升生产线的柔性和适应性。

【作者简介】陈海(1980-), 男, 中国江苏海门人, 硕士, 副教授, 从事机电一体化研究。

工业机器人则是高度集成的机电一体化设备，具备多自由度、多轴联动、可编程、柔性化以及自适应性强等显著特点，广泛应用于物料搬运、装配、焊接、喷涂、分拣等复杂、重复、危险的作业场景。机器人通过高精度伺服驱动和先进的轨迹规划算法，可以实现复杂空间运动与操作任务，大幅提升生产效率和产品一致性。工业机器人配备多样化末端执行器和传感器，能够感知环境变化，实时调整运动策略，实现自适应作业。

PLC 与机器人在功能定位上各有侧重，前者以逻辑与流程控制、设备协调与数据采集为核心优势，后者侧重于空间运动控制与高精度作业。两者协同应用能够实现优势互补：PLC 统筹生产全局，实现与传感器、执行机构、外围设备等的实时通讯与互锁，保障生产安全有序；工业机器人则专注于自动化操作任务，提升关键工序的效率和质量。通过系统集成和通讯协议打通，PLC 可与机器人实现信息互通、资源共享和流程联动，从而大幅提升生产线整体自动化与智能化水平，满足现代智能制造的多样化和柔性化需求。

2.2 协同控制技术的发展脉络

协同控制 (Coordinated Control) 理念的提出，最早源自 20 世纪末自动化系统一体化设计思想，其核心在于将生产线上的多台设备或单元置于统一协调指挥之下，实现设备间的高效协同作业。早期的工业生产线多采用单台 PLC 作为主控单元，直接对机器人及其他外围设备进行集中式控制。这种模式下，控制结构简单、实现便捷，但系统扩展性、柔性和并行处理能力有限，难以满足日益复杂和变化快速的现代生产需求。

随着工业自动化水平提升和制造过程日益复杂，生产线开始采用 PLC 与机器人分布式协同控制模式。此时，机器人具备独立控制器，通过通讯网络与 PLC 进行数据交互，实现任务分配和状态同步。现场总线技术 (如 Profibus、CANopen、DeviceNet 等) 的引入，使得多设备间的数据交换更加可靠和高效。工业以太网 (如 Ethernet/IP、Profinet、EtherCAT 等) 和实时通讯协议的普及，极大提升了控制系统的扩展能力、实时性和远程管理水平。

近年来，智能制造的发展推动了 PLC 与机器人协同控制向更高层次演进。智能协同控制系统通过分布式多控制器架构，实现生产信息的实时采集、数据融合与动态决策。生产线上多台 PLC 与多台工业机器人协同运行，能够根据工艺要求进行动态任务分配、工艺参数自适应调整和自动故障处理。工业互联网和边缘计算的引入，为协同控制系统提供了更强大的数据处理和智能决策能力。未来，基于云平台和人工智能的协同控制模式将成为主流，实现设备间的深度互联与自主优化，推动制造系统向“自组织、自学习、自适应”方向发展，支撑柔性生产、批量定制和智能决策等新型生产模式。

2.3 电气自动化系统协同控制的理论基础

电气自动化系统中 PLC 与工业机器人协同控制的实现，依托于系统集成理论、分布式控制理论、实时性与可靠性理论等多项基础理论。

系统集成理论：系统集成强调软硬件平台的开放性、标准化和兼容性。通过制定统一的接口标准和通讯协议，实现多种自动化设备的数据共享与资源整合，便于系统维护、升级和扩展。例如，OPC UA、Modbus TCP 等通讯协议成为工业自动化集成的主流选择，使 PLC 与机器人、传感器、伺服驱动器等不同厂商设备实现无缝对接。

分布式控制理论：分布式控制系统 (DCS) 理论主张将复杂系统分解为若干自治控制单元，各单元既可独立完成本地控制任务，又能通过通讯网络实现协同和信息共享，从而提升系统的灵活性、容错性和适应性。分布式架构可降低主控制单元的负载，提升整体响应速度，有利于支持多机器人、多工位并行作业和柔性生产。

实时性与可靠性理论：工业自动化系统要求在毫秒级响应时间内完成多任务调度和异常处理。实时性理论保证控制系统在严格时限内完成关键动作，确保生产流程连续、数据处理精准；可靠性理论则关注系统的稳定性、故障自诊断与自恢复能力，最大限度降低设备故障、生产中断风险。

通过融合上述理论，现代 PLC 与工业机器人协同控制系统具备以下显著优势：可实现任务分解与负载均衡，提升各设备运行效率；通过冗余设计与故障自诊断，确保系统高可靠性和安全性；支持多样化生产工艺的快速切换和自动参数优化，满足小批量、多品种、定制化生产需求；通过大数据分析云端管理，实现生产过程可视化、透明化和精益化。

3 PLC 与工业机器人集成的技术体系与实现方式

3.1 通讯与接口集成技术

实现 PLC 与工业机器人协同控制，首要任务是建立可靠高效的数据通讯机制。目前主流通讯方式包括 Profibus、Profinet、EtherCAT、EtherNet/IP、Modbus-TCP 等现场总线及工业以太网协议。不同品牌 PLC 与机器人控制器通常支持多种协议，通过通讯模块或中间件实现互联。实际工程中，PLC 一般作为上位主控，向机器人下发动作指令、接收状态反馈，并协调外围传感器与执行机构协同作业。开放式通讯协议的推广，有利于打破设备间的“黑箱壁垒”，提升系统集成与扩展能力。

3.2 控制策略与任务分工设计

在协同控制系统中，合理分配 PLC 与机器人的控制任务是实现高效运行的基础。常见模式包括：PLC 主控生产节拍与流程调度，机器人负责具体动作的精细执行；或机器人主控核心运动流程，PLC 进行外围设备与安全互锁控制。任务分工应基于工艺复杂度、通讯实时性、故障安全性等多

因素综合考虑。控制逻辑设计可采用集中式、分布式、混合式等多种架构。集中式控制易于统一管理，分布式与混合式控制有助于提升系统弹性与故障隔离能力。

3.3 协同操作与运动同步技术

PLC与机器人协同控制需实现多设备运动的精准同步。例如在装配、分拣等多工位联动场景，PLC通过高速采集信号与机器人动作触发，实现无缝对接与流水线作业。运动同步可采用信号触发、时间同步、位置反馈等多种方法。部分高端系统采用基于实时总线的运动控制协议，支持多轴设备的毫秒级同步与误差补偿。运动同步不仅提升了生产效率，也显著减少了设备干涉与安全事故风险。

4 典型协同控制系统的应用案例与效果分析

PLC与工业机器人协同控制技术已在汽车、电子、家电、物流、食品等行业获得广泛应用。以下结合典型工程案例，分析其集成模式与实际成效。

某汽车制造企业在发动机装配线应用西门子S7系列PLC与安川多轴工业机器人协同控制，PLC负责整体节拍控制与安全互锁，机器人完成发动机缸体抓取、定位和螺栓紧固。通讯采用Profinet高速工业以太网，支持实时指令下发与状态回传。通过协同控制，生产节拍提升20%，装配合格率显著提高，人工干预与设备故障率下降。

在3C电子制造领域，某智能工厂采用欧姆龙PLC与发那科机器人协同完成PCB板自动焊接与分拣。系统通过EtherCAT通讯协议，实现多工位高速信号交互与实时运动同步。协同系统能够自动识别工件型号，动态调整机器人作业参数，实现柔性生产与批量切换，有效缩短了换线时间，提高了生产线利用率。

食品包装行业某企业引入基于台达PLC与ABB机器人协同的自动分拣装箱系统，PLC集成了物料检测、输送控制与安全保护，机器人根据PLC反馈信号自动抓取不同规格产品进行分类装箱。系统集成开放接口，支持后期快速扩展与功能升级。运行数据显示，系统作业效率提升30%，产品包装错误率降至千分之二以下，极大提升了客户满意度和市场竞争力。

这些实际案例表明，PLC与工业机器人的深度协同不仅优化了工艺流程，提升了生产效率与产品质量，还显著降低了人工成本与运营风险，为智能制造系统的建设与运营提供了有力保障。

5 当前技术瓶颈与协同控制优化方向

尽管PLC与工业机器人协同控制技术取得诸多进展，但在实际推广应用仍面临一系列挑战。首先，异构设备间协议兼容性与接口集成难度较大，不同品牌设备通讯标准不统一，集成过程存在适配瓶颈。其次，传统PLC与机器人控制器的计算能力和实时性能难以应对超大规模、复杂工艺、多任务并行等智能制造需求。系统在应对高动态变化、非结构化作业和大数据流处理方面仍有不足。

为解决上述问题，应从以下几个方向优化提升：一是推进通讯协议标准化和接口开放，推动主流PLC与机器人厂商合作开发兼容性更强、易于集成的软硬件平台，简化系统集成过程；二是加快控制器智能化升级，采用边缘计算、工业物联网、大数据分析等新一代技术，提升系统自主决策与自适应能力；三是强化安全防护与故障容错，建立多级监控、动态报警与自修复机制，保障系统稳定高效运行；四是推广模块化、可重构架构设计，实现生产线快速切换与柔性制造，满足多品种小批量定制化需求。同时，应加强人才培养与多学科交叉，提升系统集成、运维与智能优化能力。

6 结语

PLC与工业机器人协同控制作为电气自动化系统的重要发展方向，已成为现代智能制造系统构建的核心技术支撑。未来，PLC与工业机器人协同控制将更加注重新标标准化、智能化与网络安全，通过软硬件协同创新，为制造企业带来更高的效率、更强的柔性及更优的经济效益。只有不断推进技术升级和系统优化，才能支撑工业4.0时代高端制造与智能工厂建设的现实需求，实现自动化产业的可持续健康发展。

参考文献

- [1] 贾瑞兴.人工智能技术在电气自动化控制中的应用[J].造纸装备及材料,2024,53(11):133-135.
- [2] 冒泽懿.PLC技术在电气自动化领域中的应用研究[J].造纸装备及材料,2024,53(10):106-108.
- [3] 黄祺欣.基于PLC控制技术的电气自动化控制系统优化研究[J].自动化应用,2024,65(S1):152-154.
- [4] 宦键,田燕.智能制造背景下电气自动化专业人才培养模式创新研究[J].现代职业教育,2024,(15):153-156.
- [5] 秦良泽,郭鹏翔.电气自动化中电子电工技术的应用[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(四).安阳工学院,2024:180-182.